

## 150 t 钢包炉 (LF) 精炼过程控制钢水增氮的工艺实践

杜和平 杨志才

(江阴兴澄特种钢铁有限公司工艺研究所, 江阴 214400)

**摘要** 兴澄特钢生产碳素结构钢和船板用钢的生产流程为 150 t BOF-LF-RH-200 ~ 250 mm 板 CC 工艺。统计分析了精炼过程造渣埋弧操作、送电制度、LF 加热时间、钢包底吹氩等工艺因素对钢水增氮的影响。通过控制除尘吸风管道阀门开启度,保持 LF 内微正压操作,精炼前采用较高供电功率,后期用低供电功率,精炼前、中、后期分别采用氩气流量 200, 400 ~ 500, 200 ~ 300 L/min, 以及控制 LF 渣量 1.2% 等措施可使 LF 精炼过程的增氮量  $\leq 5 \times 10^{-6}$ , 不经过 RH 真空处理, 可控制板坯氮含量  $\leq 50 \times 10^{-6}$ 。

**关键词** 低碳钢 LF 精炼 控制钢水增氮 工艺实践

## Process Practice on Control of Nitrogen Pick-up in Molten Steel during 150 t Ladle Furnace (LF) Refining Process

Du Heping and Yang Zhicai

(Technology Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214400)

**Abstract** Flow sheet for production of carbon structure steel and steel for ship plate at Xingcheng Special Steel is 150 t BOF-LF-RH-200 ~ 250 mm slab CC process. Effect of slag-making submerged arc operation, power supply schedule, LF heating time, ladle bottom argon blowing etc process factors on nitrogen pick-up in molten steel during refining process has been statistic-analyzed. With controlling of opening of valve in dust-exhausting absorbing wind tube to maintain slight positive-pressure operation in LF, in earlier period of refining using higher power supply and in latter period of refining using lower power supply, blowing argon rate in earlier, middle and latter refining period being respectively 200, 400 ~ 500 and 200 ~ 300 L/min, and controlling LF slag amount ratio 1.2% etc measures, the increment of [N] in LF refining process is  $\leq 5 \times 10^{-6}$ , and without via RH vacuum treatment, it is available to control the nitrogen content in slab  $\leq 50 \times 10^{-6}$ .

**Material Index** Low Carbon Steel, LF Refining, Control of Nitrogen Pick-up in Molten Steel, Process Practice

钢中氮含量高会使钢材产生应力失效,显著降低钢的塑性、韧性,并影响钢的焊接性能<sup>[1]</sup>,尤其对非细化晶粒钢,氮含量越低越好。江阴兴澄特种钢铁有限公司特板炼钢厂板坯连铸机生产的 CCSB 级船板钢种,要求  $[N] \leq 60 \times 10^{-6}$ ,因采取 BOF-LF-CCM 流程,在 LF 精炼时,如果操作不当会造成钢水增氮过多,导致成品氮高出格。为此,特板炼钢厂对板坯生产过程中氮含量变化进行了大量的检测和摸索。

### 1 氮含量控制现状

特板炼钢厂目前有 2 台 150 t BOF、2 台 150 t 双工位 LF、2 台 150 t 双工位 RH、2 台 1 机 1 流板坯连铸机和 1 台方圆坯连铸机。板坯连铸机生产的海洋工程用钢、高层建筑用钢、管线钢、船板钢、桥梁钢、高强度低合金结构钢、高强度耐磨钢大都要求  $[N] \leq 60 \times 10^{-6}$ 。而为控制生产成本,对于 CCSB 级船板钢,使用不过 RH 处理工艺,采取 BOF-LF-CCM (板坯连铸) 的生产工艺路线,板坯断面规格为  $(200 \sim 250) \times (1\ 600 \sim 1\ 800)$  mm,但要确保

成品氮含量小于  $60 \times 10^{-6}$ ,LF 精炼过程控制钢水增氮成为一关键。

试验钢种化学成分要求见表 1。目前生产过程中各工序钢水氮含量及增氮情况见表 2。

由表 2 可见,BOF 转炉出钢结束氮含量能控制在  $35 \times 10^{-6}$  以内,CCM (连铸) 是全程保护浇注,钢水增氮很低,可控制在  $2 \times 10^{-6}$  以内。钢水增氮主要发生在 LF 精炼过程中,LF 精炼过程增氮在  $4 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$ ,很不稳定。

### 2 LF 精炼过程增氮影响因素分析

#### 2.1 造渣埋弧效果的影响

表 1 试验钢种的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of test steel grades / %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N
CCSB-1	0.10 ~ 0.14	0.15 ~ 0.30	0.80 ~ 0.95	$\leq 0.018$	$\leq 0.012$	0.020 ~ 0.040	0.010 ~ 0.018	$\leq 0.006$
	0.14 ~ 0.18	0.15 ~ 0.30	0.80 ~ 0.95	$\leq 0.018$	$\leq 0.012$	0.020 ~ 0.040	0.010 ~ 0.018	$\leq 0.006$
CCSB-2	0.14 ~ 0.18	0.15 ~ 0.30	0.80 ~ 0.95	$\leq 0.018$	$\leq 0.012$	0.020 ~ 0.040	0.010 ~ 0.018	$\leq 0.006$
	0.14 ~ 0.18	0.25 ~ 0.40	1.43 ~ 1.55	$\leq 0.020$	$\leq 0.012$	0.025 ~ 0.045	0.010 ~ 0.030	$\leq 0.006$

表2 船板钢各冶炼工序钢水氮含量和增氮量 /10<sup>-6</sup>  
Table 2 Nitrogen content in molten steel and increment of nitrogen in each steelmaking process of steels for ship plate / 10<sup>-6</sup>

炉号	钢种	BOF 出钢 结束[N]	LF 处理 后[N]	CCM [N]	LF 增氮	CCM 增氮
1265	CCSB-1	23	38	39	15	1
1268	CCSB-1	33	37	37	4	0
1281	CCSB-2	28	49	49	21	0
1287	CCSB-2	22	41	42	19	1
1288	CCSB-2	24	29	31	5	2

钢液裸露是 LF 精炼过程增氮的直接原因<sup>[2]</sup>, LF 在送电加热时,电弧温度高达6 000 ℃,在电弧作用下,钢水表面形成凹坑,电弧直接加热凹坑部位钢水,该部位钢液温度超过2 300 ℃,在温度达2 130 ℃,钢液中会发生如下氮的溶解反应<sup>[3]</sup>:

$$\frac{1}{2}N_{2(g)} = [N] \quad (1)$$

$$k = a_N / \sqrt{p_{N_2}} = [N] f_N / \sqrt{p_{N_2}}$$

式中: $f_N$ - [N]活度系数; $p_{N_2}$ - 氮分压; $a_N$ - [N]活度。

$$因此, [N] = \frac{k}{f_N} \sqrt{p_{N_2}} \quad (2)$$

氮溶解反应常数与温度的关系为:

$$\lg k = \frac{-a}{T} - b \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ - 正常数。

由式(2)和(3)可见,在氮分压一定时,温度越高,钢液中氮的溶解度也高;在温度一定时,氮分压越高,钢液中氮的溶解度也高。

所以,LF 在送电加热操作时,要注意炉盖与钢包间的密封,保持炉内微正压,减少高温电弧电离其周围的空气中的氮,如果造渣埋弧不好,凹坑部位钢液裸露,电弧电离其周围空气、原料中的氮,容易进入钢液,导致钢水增氮。

### 2.2 送电制度

渣温高低会对钢液吸氮产生一定的影响,渣温越高,越有利于钢液吸氮<sup>[4]</sup>。图1(a)是实际典型的供电档位下钢水增氮情况,可见供电档位对钢水增氮明显。各供电档位对应电压、电流见表3。

### 2.3 送电加热时间

LF 送电加热时间的长短,对钢水增氮影响明显,送电加热时间越长,电弧电离增氮的机会就越多,钢水增氮

越严重,由表4可见,在确保钢水温度的前提下,应尽量减少送电时间。

### 2.4 钢包底吹氩气

LF 精炼过程,如果操作不当,吹氩量过大,容易使钢液面大面积裸露,造成钢水增氮和二次氧化严重,尤其送电加热过程中,钢水更易增氮。图1(b)是吹氩情况与钢水氮含量的变化关系图。

### 2.5 成分要求对钢水增氮的影响

钢液中氮的溶解度与钢成分有关,如式(4)<sup>[5]</sup>。

$$[N] = 0.044 - 0.01[C] - 0.0025[Mn] - 0.003[Si] - 0.0043[P] - 0.001[S] + 0.0069[Cr] + 0.013[V] - 0.001[Ni] - 0.01[Al] + 0.1[Ti] + 0.0015[Mo] + 0.0102[Nb] - 0.0004[Cu] \quad (4)$$

由式(4)可知,Ti、V、Nb 等元素使钢中氮的溶解度增加,这是由于Al、Ti、V、Nb这些合金元素易

表3 供电档位对应的电压和电流

Table 3 Power supply regulation grades corresponding voltage and current

供电档位	电压/V	电流/kA
4	395	44.52
5	375	44.52
7	335	44.52
9	295	44.52
11	255	44.52

表4 LF 加热时间对钢水增氮的影响

Table 4 Effect of LF power-on time on nitrogen pick-up in molten steel

炉号	钢种	送电时 间/min	送电功率/ kVA	LF 处理前 氮/10 <sup>-6</sup>	LF 处理后 氮/10 <sup>-6</sup>	LF 增氮/ 10 <sup>-6</sup>
555	CCSB-1	22	14 023	26	48	22
556	CCSB-1	18	14 914	19	33	14
557	CCSB-1	17	15 804	21	36	15

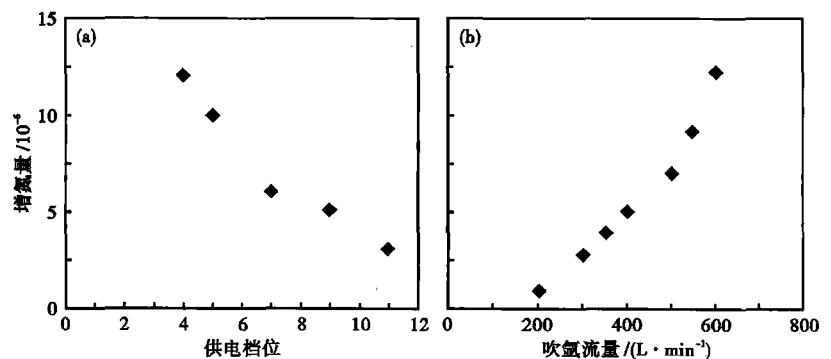


图1 供电档位(a)和吹氩流量(b)对150 t LF 钢水增氮量的影响  
Fig.1 Effect of power supply regulation grade (a) and argon blowing rate (b) on increment of nitrogen in molten steel of 150 t LF

与 N 形成氮化物、碳氮化物,使钢液容易吸氮;而 C、Mn、Si、P、S、Ni、Cu 元素有利于降低氮在钢中的溶解度,即这些元素含量越高,氮的溶解度越低。兴澄特钢板坯大多数钢种都是要求  $[S] \leq 0.007\%$ 、且含有 Ti、V、Nb 等合金化元素  $[C] \leq 0.16\%$  的低碳钢,钢水更易增氮,因此也提高了控制增氮的难度。

### 3 LF 精炼过程增氮控制措施

#### 3.1 控制除尘吸风管道阀门开启度

在精炼前期,由于炉内产生的烟量大,在保持炉内微正压操作情况下,除尘吸风管道阀门开启度可大点,确保炉盖电极孔、炉门处不要冒较大烟尘。而在精炼中、后期,炉内产生烟气较少,这时将除尘吸风管道阀门开启度适当调小,保证炉内微正压,一般调整到电极孔、炉门口处略有烟气冒出即可,减少空气吸入炉内。

#### 3.2 控制供电档位

LF 精炼前期,由于要在较短时间内化渣、升温,尽快造泡沫渣埋弧,应选用较高功率档位,但如果功率过高,由于前期渣未化好,埋弧不良,易导致钢水增氮严重,而且送电时噪音大,电极晃动严重,易断电极,所以供电档位选择较高功率的低档位 5~7 档。在精炼中期,精炼泡沫渣已造好,埋弧良好,此时升温可使用 7~9 档,在精炼后期,钢水成分、温度都已调到位,选择低功率的档位 10~12 档进行保温。

#### 3.3 调整钢包底吹氩操作

BOF 出钢结束,钢包到 LF 座位,开通底吹氩气破渣,现场实际操作是将氩气开旁通,大流量大压力搅拌一段时间,再调小氩气流量,进行送电加热,而在氩气开旁通大流量搅拌时,钢渣液面翻腾厉害,钢水裸露严重,也会增加吸氮机会。而在送电加热冶炼过程中,为加强脱氧脱硫,氩气流量也在 400~700 L/min,钢水也有裸露现象。现采取如下操作:

(1) 钢包在 LF 座位时,如果顶渣无大的未化和结壳渣块,吹氩流量不宜在 700 L/min 左右,只要能吹破渣面不影响送电起弧即可,且送电前要调小流量,严禁大流量长时间吹氩搅拌钢渣液面。

(2) 如果钢包顶渣有大的结壳渣块,可短时间调大吹氩流量将渣壳吹开,渣壳吹开后立即调小氩气流量,进行送电加热化渣。

(3) 精炼前期化渣,采用较小氩气流量在 200 L/min 左右。

(4) 精炼中期,造渣埋弧良好,调整氩气流量 400~500 L/min,加强钢水脱氧脱硫和合金化。

表 5 优化工艺后 LF 精炼过程钢水的氮含量增氮量 /  $10^{-6}$   
Table 5 Nitrogen content in molten steel and increment of nitrogen during LF refining, after process optimization /  $10^{-6}$

炉号	钢种	LF 处理前 氮含量	LF 处理结束 氮含量	LF 增氮量
1325	Q345B-4	25	29	4
1326	Q345B-4	22	27	5
1327	Q345B-4	31	34	3
1329	Q345B-4	28	33	5
1330	Q345B-4	20	25	5
1331	Q345B-4	24	27	3
1332	Q345B-4	33	35	2
1333	Q345B-4	25	30	5

(5) 精炼后期,钢液  $[O]$ 、 $[S]$  低,更易吸氮,防止钢液裸露,氩气流量控制在 200~300 L/min。

#### 3.4 加强埋弧操作

LF 精炼渣量原来按 1.0% 左右控制,但由于钢包形状是矮胖形,实际钢包内渣层较薄,埋弧效果不太好,送电加热时,声音较大,因此增大 LF 精炼渣量,按 1.2% 左右控制,且加强用碳化硅、碳粉进行扩散脱氧操作,埋弧效果大有改善,加热过程中,声音较小。另外,钢包在精炼炉座位后,适当加入低熔点高碱度预熔合成渣,送电后能快速形成性能良好的液态渣覆盖钢液,减少钢液裸露。

### 4 采用控制措施的效果

由表 5 可知,LF 操作调整后,LF 精炼过程中增氮较小,能控制在  $5 \times 10^{-6}$  以内,而连铸增氮能控制在  $2 \times 10^{-6}$  以内,所以不经过 RH 真空处理钢种,板坯成品氮含量可控制在  $50 \times 10^{-6}$  以下。

### 5 结语

(1) LF 精炼过程中钢水增氮主要受送电档位控制、钢包底吹氩控制、造渣埋弧情况、除尘吸风管道阀门开启度等因素影响。

(2) 在加强送电档位控制、埋弧、吹氩等操作后,LF 精炼过程中增氮量应控制在  $5 \times 10^{-6}$  以内。

#### 参考文献

- [1] 李晶. LF 精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:73-74.
- [2] 项长祥,杨斯馥. 合成渣对钢液吸氮的保护作用[J]. 北京科技大学,1998,20(2):122-125.
- [3] 常金宝,魏国增,高华军. LF 精炼钢增氮因素分析[J]. 金属世界,2008(4):16-18.
- [4] 作者不祥. 炼钢-连铸新技术 800 问[M]. 北京:冶金工业出版社,2003:189-190.
- [5] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京:冶金工业出版社,1990:90-91.

杜和平(1972-),男,工程师,1997 年湖南株州冶金专科学校(大专)毕业,钢铁冶炼工艺技术研究。

收稿日期:2014-08-07